УДК 621.315

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯТОРАХ ИЗ ФАРФОРА И ПОЛИКАРБОНАТА

С.М. Куценко, Н.Н. Климов, В.И. Муратов

Иркутский государственный университет путей сообщения
E-mail: kucenko_s@iriit.irk.ru, klinn@iriit.irk.ru

Проведены исследования и проанализированы характеристики электромагнитного поля и акустического шума, которые возникают при появлении частичных разрядов в фарфоровых изоляторах и в их полимерном аналоге, изготовленного из поликарбоната. Длительность импульсов частичных разрядов составляет 5...20 нс, частота следования – 50...500 Гц для фарфоровых изоляторов и порядка 4 кГц – для поликарбоната.

Для повышения качества диагностики фарфоровых изоляторов контактной сети железной дороги предлагается дополнить существующий акустический метод диагностики электромагнитным методом регистрации частичных разрядов с использованием антенны.

Введение

Из общей протяженности железных дорог (85,5 тыс. км) 42,3 тыс. км являются электрифицированными. Надежность контактной сети в большей степени определяет бесперебойную работу железной дороги. Из анализа работы хозяйства электроснабжения [1, 2] следует, что большинство отказов (до 75 %) в эксплуатации приходится на контактную сеть, а четверть из них из-за повреждения изоляции. Наиболее ненадежными являются подвесные фарфоровые тарельчатые изоляторы, которых в эксплуатации находится 8,7 млн штук, что составляет больше половины от общего количества изоляторов. Поэтому для предотвращения отказов требуется периодически диагностировать изоляцию контактной сети.

Наибольшее число изоляторов изготовлено из фарфора или стекла. Для фарфоровых изоляторов характерными дефектами являются повреждения глазури, разрушение цемента, соединяющего изоляционные элементы изолятора и с его стержнем. Эти дефекты изолятора приводят к появлению ча-

стичных разрядов (ЧР). Стеклянные изоляторы, в отличие от фарфоровых, «самодефектируются», то есть закаленное стекло при повреждениях разрушается под действием механических напряжений. Но, в целях повышения надежности, принято также контролировать гирлянды стеклянных изоляторов в тоннелях ввиду их сильного загрязнения.

Цель работы – исследовать характеристики электромагнитных и акустических сигналов, возникающих при появлении ЧР в фарфоровых тарельчатых изоляторах и найти возможность усовершенствования метода дистанционной диагностики контактной сети, для выявления дефектных гирлянд фарфоровой изоляции; сравнить характеристики с данными ЧР в изоляторе из поликарбоната.

Акустическая диагностика изоляторов. Из многолетнего опыта работников службы электрификации Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) по выявлению дефектных изоляторов контактной сети следует, что наиболее эффективным способом является акустическая диагностика при помощи ультразвукового детектора типа УД-8 [3, 4]. Прибор позволяет дистанционно под рабочим напряжением выявить дефектные гирлянды изоляторов. Регистрация акустического шума, вызванного появлением ЧР в изоляции [3–8], осуществляется в диапазоне частот 38...45 кГц при помощи пьезоэлектрического микрофона. Далее сигнал проходит через резонансный узкополосный усилитель ультразвуковых частот, детектируется, фильтром низких частот выделяется огибающая, спектр которой лежит в звуковом диапазоне, усиливается и подается в головные наушники и на стрелочный индикатор. Информационным признаком наличия неисправного изолятора в гирлянде является появление характерного треска в наушниках прибора. Однако УД-8 достаточно часто диагностирует нормальные гирлянды как неисправные [9] и не позволяет позиционировать неисправный изолятор в гирлянде.

Для решения задачи улучшения методики выявления неисправных изоляторов необходимо проведение исследований характеристик не только акустических шумов, но и электромагнитных сигналов, а также сопоставление их с характеристиками частичных разрядов.

Для этих целей использовались гирлянды фарфоровых изоляторов, которые были выявлены прибором УД-8 как неисправные. Исследования проводились с использованием высоковольтной установки типа WPT 4,4/100, напряжение и ток регистрировались магнитоэлектрическими приборами (киловольтметром и микроамперметром) с классом точности 1,5 %. Регистрация акустических и электромагнитных импульсов осуществлялась цифровым осциллографом при помощи ультразвуковых детекторов и антенн соответственно (рис. 1). Напряжение на исследуемую гирлянду подавалось в интервале 0...30 кВ (номинальное напряжение в контактной сети переменного тока 27,5 кВ с допустимым отклонением 21...29 кВ [10]).

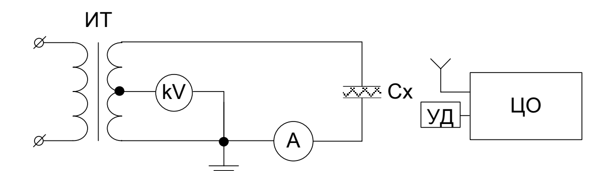


Рис. 1. Принципиальная схема регистрации ЧР в изоляторах. ИТ – испытательный трансформатор, Сх – исследуемая гирлянда фарфоровых изоляторов, УД – ультразвуковой детектор, ЦО – цифровой осциллограф

Анализ акустического излучения. Частота следования акустических импульсов разрядов измерялась цифровым осциллографом на низкочастотном выходе ультразвукового детектора типа УД-8. При исследовании гирлянд, состоящих из двух исправных изоляторов (сопротивление исправного изолятора выше 300 МОм [11]) и одного неисправного было установлено, что в наушниках УД-8 в интервале напряжений 18...24 кВ появляется характерный треск, генерируемый ЧР. Частота следования акустического сигнала 50 Гц. При повышении напряжения до 30 кВ интенсивность звука увеличивается, но при этом частота следования импульсов акустического сигнала остается неизменной, а наблюдается только увеличение амплитуды сигнала. При исследовании гирлянд, состоящих из одного исправного и двух неисправных изоляторов, частота следования импульсов акустического сигнала возросла до 100 Гц.

Предварительный вывод: при наличии в гирлянде одного неисправного изолятора регистрируемая частота импульсов акустического сигнала равна 50 Гц, если же в гирлянде два неисправных изолятора, то регистрируемая частота равна 100 Гц.

Существенно снижен уровень амплитуд посторонних шумов на ультразвуковом дефектоскопе Ultraprobe [6], который имеет более узкую диаграмму направленности, регулируемый частотный диапазон от 20 до 100 кГц, более чувствителен и эргономичен. На рис. 2 приведены осциллограммы, полученные при высоком напряжении от разных гирлянд фарфоровых изоляторов, при регистрации акустического сигнала дефектоскопом Ultraprobe. Эти измерения подтвердили вывод о прямой зависимости частоты следования акустического сигнала от количества неисправных изоляторов в гирлянде, рис. 2. Величина акустического давления, измеренная ультразвуковым регистратором типа SVAN на частоте 36 кГц, составляла примерно 30 мкПа.

Благодаря узкой диаграмме направленности (~3°) датчика Ultraprobe было установлено место появления разряда. Акустический сигнал был сконцентрирован на очень малой площади излучения, рис. 3. Визуальные наблюдения в темноте подтвердили отсутствие на поверхности сухого изолятора стримеров скользящих разрядов. После увлажнения гирлянды при её частичном высыхании, визуально наблюдались поверхностные частичные разряды, которые регистрировались ультразвуковыми

детекторами Ultraprobe и УД-8. Отсюда можно сделать вывод, что источником этого сигнала на сухой гирлянде являлся частичный разряд.

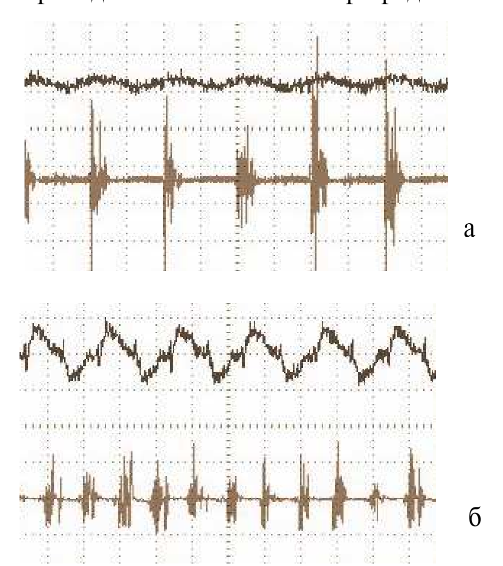


Рис. 2. *Осциллограммы акустического шума на гирляндах из трех изоляторов: а) Частота следования импульсов 50 Гц, масштаб: по оси X – 10 мс/дел, по оси Y – верхний сигнал – 2 мВ/дел и нижний сигнал – 100 мВ/дел. Сопротивление изоляторов в гирлянде: ∞, 2,5 ГОм и ∞; б) Частота следования импульсов 100 Гц, масштаб: по оси X – 10 мс/дел., по оси Y – верхний сигнал – 10 мВ/дел. и нижний сигнал – 500 мВ/дел. Сопротивление изоляторов в гирлянде: 12 МОм, 75 МОм и 7 ГОм*



Рис. 3. *Локация звука, зарегистрированная Ultraprobe на расстоянии 1 м. Максимальная интенсивность звука зафиксирована на частоте в районе 30 кГц (белый крест указывает место локализации источника звука ЧР)*

Таким образом, акустический метод позволяет выявить: а) выход из строя одного или двух изоляторов в гирлянде; б) загрязнение гирлянды или ее увлажнение.

Анализ электромагнитного излучения. Одновременно с акустической регистрацией ЧР в изоляторах с использованием антенн для приёма электромагнитного излучения были проведены измерения частоты следования импульсов ЧР, их длительности, амплитуды и спектра. Схема регистрации электромагнитных импульсов ЧР в изоляторах приведена на рис. 1. При исследовании использовались разные типы антенн, но наилучшие результаты были получены при помощи широкополосного вертикального штыря высотой 86 мм и шириной 24 мм. Регистрация электромагнитных импульсов осуществлялась при помощи осциллографа типа DSO3202A – диапазон измерений до 200 МГц. Во время эксперимента антенна располагалась на расстоянии около полутора метров от исследуемой гирлянды изоляторов.

В зависимости от количества исправных изоляторов в гирлянде из трёх изоляторов, как и в случае с акустическим сигналом при наличии одного неисправного изолятора частота следования импульсов ЧР равна 50 Гц, причем импульсы регистрируются только на положительной полуволне (рис. 3, *а*). Следует отметить, если акустический импульс, регистрируется как одиночный, то его генерирующий электромагнитный сигнал, как правило, представляет собой последовательность из 3–5 импульсов (см. рис. 4, *в*). При наличии в такой гирлянде двух неисправных изоляторов частота последовательностей импульсов возрастает вдвое (рис. 3, *б*).

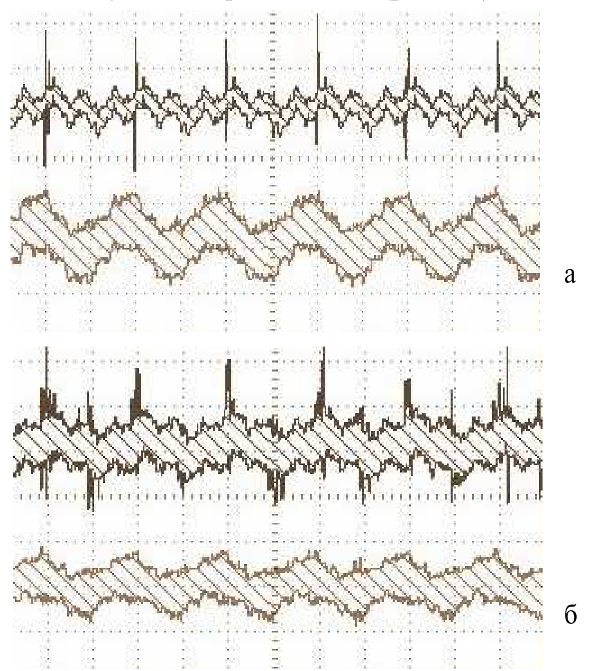


Рис. 4. *Осциллограммы последовательности электромагнитных импульсов ЧР: а) два исправных изолятора. Напряжение 27 кВ. Масштаб: по оси X – 10 мс/дел., по оси Y – верхний сигнал – 5 мВ/дел и нижний сигнал – 10 мВ/дел.; б) три изолятора в гирлянде: (один исправных и два неисправных). Напряжение 27 кВ. Масштаб: по оси X – 10 мс/дел., по оси Y – верхний сигнал – 2 мВ/дел и нижний сигнал – 10 мВ/дел.*

Предварительный вывод: как и при регистрации акустических сигналов, частота следования импульсов ЧР при регистрации электромагнитным способом напрямую зависит от числа исправных изоляторов.

Преимущество электромагнитной диагностики по сравнению с акустической заключается в повышении чувствительности, т.е. в снижении порога напряжения на 15...20 %, при котором начинается

регистрация ЧР. Например, при подаче высокого напряжения на гирлянду, состоящую из двух неисправных и одного исправного изоляторов, электромагнитный сигнал наблюдается уже при 17 кВ, тогда как акустический сигнал едва регистрируется с расстояния одного метра прибором типа Ultraprobe при 20 кВ.

Известно, что электромагнитное излучение ЧР представляет собой видеоимпульс [8]. В твердых диэлектриках, согласно источникам [8, 12], длительность импульса ЧР изменяется в диапазоне от 3 до 10 нс с продолжительностью фронта 1,5...5 нс.

В наших исследованиях регистрируемый частотный диапазон ЧР на фарфоровых изоляторах простирается до предельной частоты осциллографа 200 МГц, формы регистрируемых сигналов – в основном радиоимпульсы (рис. 4, *а*, *в*), в некоторых случаях наблюдались видеоимпульсы (рис. 4, *г*). Частота заполнения радиоимпульса определяется как параметрами приемного контура, образованного измерительной системой, так и спектром электромагнитного импульса ЧР, а длительность радиоимпульса – добротностью контура. Частота следования импульсов ЧР и их длительность определяет спектральные характеристики сигналов, т.е. длительность импульса ЧР определяет ширину спектра. Для примера, на рис. 4 приведены осциллограмма электромагнитного импульса ЧР и ее спектр. Сигнал зарегистрирован при напряжении 27 кВ, которое подавалось на два исправных изолятора. Из рис. 4, *б*, видно, что ширина спектра равна 125 МГц, следовательно, длительность импульса ЧР примерно равна 12 нс. Одиночный импульс ЧР дает сплошной спектр, а серия из нескольких импульсов дает линейчатый спектр, причем частота следования импульсов в этой серии определяется интервалом между линиями спектра. На рис. 4, *б*, разница составляет примерно 25 МГц, т.е. период следования импульсов ЧР в данном случае равен 40 нс. Из зарегистрированного набора дискретных частот спектра следует, что длительность импульсов изменяется от 5 до 20 нс, а интервал между импульсами составляет 15...100 нс.

Аналогичные результаты по численным значениям регистрируемых частот ЧР на штыревых фарфоровых изоляторах при напряжении 10 кВ получены в [13]. Наблюдения проведены панорамным радиоприемником и получены достаточно высокие интенсивности сигнала в диапазоне частот 10...50 МГц. Автор ошибочно объясняет этот спектр излучением ионов (!), возникающих при искровом разряде [13. С. 141]. На самом деле, как это следует из приведённых выше результатов, этот спектр обусловлен характеристиками искрового разряда в изоляторе или на его поверхности. Источником электромагнитного излучения, которое регистрируется радиотехническими методами, являются ускоренно движущиеся электроны, а не ионы. Ионы же участвуют в процессах рекомбинации с электронами, и оптическое излучение обусловлено этим механизмом.

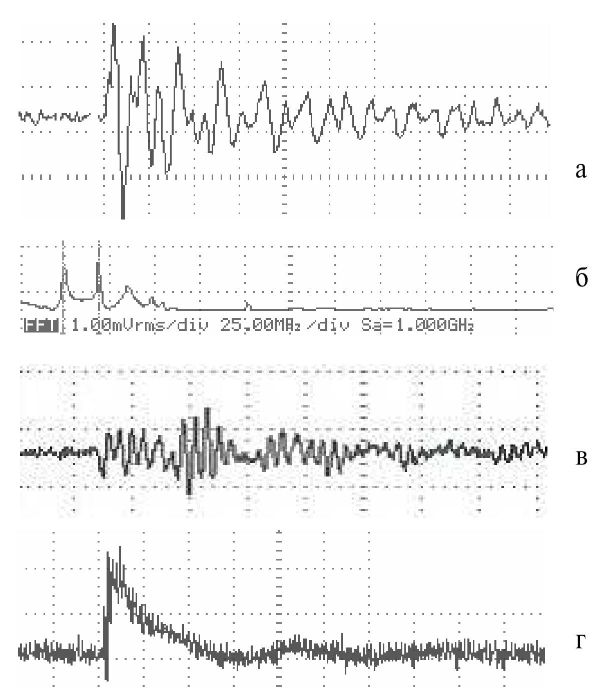


Рис. 5. *Осциллограммы и спектр ЧР в фарфоровой изоляции: а) Осциллограмма импульсов ЧР, масштаб: по оси X: 50 нс/дел, по оси Y: 5 мВ/дел.; б) Спектр импульсов ЧР, масштаб по оси X – 25 МГц/дел, по оси Y – 1 мВ/дел. Маркерами отмечены максимумы спектра 23 и 43 МГц; в) Последовательность из нескольких ЧР, уменьшающихся по амплитуде (3–5 импульсов), с общей продолжительностью порядка 100 нс. Масштаб: по оси X – 20 нс/дел, по оси Y – 2 мВ/дел.; г) Осциллограмма импульсов ЧР. Видеоимпульс. Масштаб: по оси X – 200 нс/дел, по оси Y – 2 мВ/дел.*

Оценки наблюдаемых величин электрического заряда и токов ЧР, акустического и электромагнитного излучения на фарфоре и поликарбонате. Для сравнения электрофизических характеристик фарфора с полимером по размерам фарфорового тарельчатого изолятора типа ПФ-70-А из поликарбоната был изготовлен подобный изолятор. Для повторения конструкции электродов и уменьшения влияния «тройной точки» соединение металлического стержня (на него во время эксперимента подавалось напряжение, как это делается на железной дороге) с тарелкой полимерного изолятора было осуществлено через диск из медной фольги, приклеенной эпоксидным клеем с металлическим порошком. Вторым электродом, который был заземлен, также был металлический стержень, соединенный с изолятором.

В отличие от фарфора на изоляторе из поликарбоната, частота следования импульсов ЧР составляла примерно 4 кГц. Из спектральных характеристик следует что интервал между импульсами составляет 80...100 нс, а длительность примерно равна 8 нс (рис. 5, *б*).

Параллельно измерениям электромагнитного поля велась регистрация и акустического сигнала посредством прибора Ultraprobe. Максимум интенсивности акустического шума регистрировался на

частотах 30 кГц и в диапазоне частот 90...100 кГц. На рис. 6 четко наблюдается основная частота следования пачек разрядных импульсов 100 Гц, но часто вблизи максимума питающего напряжения регистрируется еще несколько импульсов ЧР.

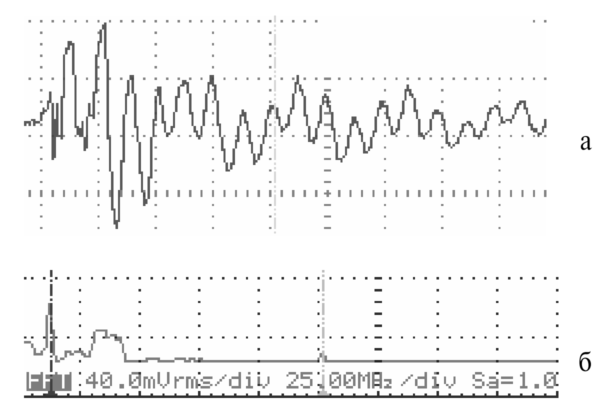


Рис. 6. *Осциллограмма и спектр ЧР на изоляторе из поликарбоната: а) Осциллограмма импульсов ЧР, масштаб: по оси X: 50 нс/дел, по оси Y: 100 мВ/дел.; б) Спектр импульсов ЧР, масштаб по оси X – 25 МГц/дел, по оси Y – 40 мВ/дел. Маркерами отмечены максимумы спектра 12 и 126 МГц*

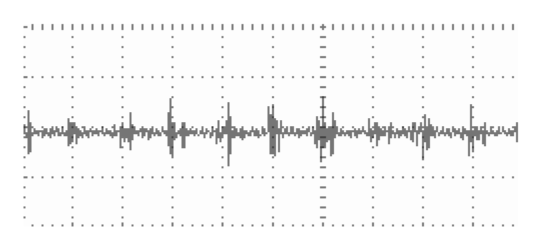


Рис. 7. *Осциллограмма акустического шума на полимерном изоляторе. Сигнал зарегистрирован при помощи ультразвукового детектора типа Ultraprobe. Напряжение на изоляторе 20 кВ. Масштаб Y: 200 мВ/дел, X: 10 мс/дел.*

Во время проведения экспериментов для примерной оценки величины заряда, возникающего при появлении ЧР, были использованы измерения интегрального тока микроамперметром (см. схему на рис. 1), протекающего в цепи в отсутствие и при наличии разрядов. Для построения зависимости суммарного тока, обусловленной добавлением тока ЧР к емкостному току, была вычислена емкость полной цепи при низких напряжениях. Затем был вычислен емкостный ток при высоких напряжениях и получено приращение тока за счёт появления ЧР. Разница между емкостным и регистрируемым током дает ток, определяемый появлением ЧР. Величина заряда ЧР в этом случае определяется частным от деления разности токов на частоту следования импульсов. Приведенные в таблице данные получены в диапазоне напряжений 2...30 кВ. Например, в случае полимерного изолятора разница между регистрируемым и емкостным током равна 8,3 мкА. Частота следования импульсов для этого случая примерно равна 4 кГц, величина заряда ориентировочно составляет 2 нКл.

Для оценки импульсов ЧР использовался также интегрирующий пояс Роговского (кольцо из феррита М-40 диаметром 60 мм, на котором намотано 120 витков – нихром, диаметр 0,1 мм, сопротивление 1,4 кОм, емкость 0,5 мкФ), сквозь который был пропущен заземляющий провод. Отметим, что поясом Роговского не было зарегистрировано увеличение тока при наличии ЧР. Это связано с тем обстоятельством, что в момент ЧР разрядный ток возникает за счёт заряженной емкости, бездефектной части изолятора. Время заряда этой емкости определяется постоянной времени всей питающей цепи и составляет несколько сотен мкс, и, соответственно, уменьшает величины разрядного тока до величин, не регистрируемых поясом Роговского [7].

Таблица. *Характеристики изоляторов*

Напряжение, кВ	Регистрируемый ток, мкА	Емкостной ток, мкА	Разность емкостного и регистрируемого тока, мкА	Частота следования импульсов ЧР, Гц	Заряд ЧР, нКл	Ток разряда, А
Гирлянда из двух фарфоровых изоляторов (один исправный, другой нет)						
26	276	218	58	300	200	10...40
Гирлянда из трех фарфоровых изоляторов (один исправный, два неисправных)						
25	128	120	8	150	53	2...10
Полимерный изолятор из поликарбоната						
25	50	42	8,3	4000	2,1	0,2

Сопоставляя полученные данные нескольких экспериментов по регистрации акустических и электромагнитных импульсов ЧР в фарфоровом изоляторе и изоляторе из поликарбоната, можно сделать следующие выводы:

1. Анализ акустического и электромагнитного излучения частоты следования импульсов частичных разрядов в фарфоровой изоляции при оптимальном уровне напряжения на гирлянде показал, что: при наличии одного неисправного изолятора в гирлянде, состоящей из трех фарфоровых изоляторов, регистрируется частота 50 Гц, если же регистрируется частота 100 Гц, то в гирлянде неисправны два изолятора.
2. Для раннего обнаружения дефектов изоляторов акустическую диагностику изоляторов, проводимую УД-8, рекомендуем дополнить электромагнитной с регистрацией тока ЧР.
3. Длительность импульса ЧР фарфоровых изоляторов лежит в интервале 5...20 нс; в полимерном изоляторе порядка 8 нс.
4. Величины частот радиоимпульса, связанного с появлением ЧР в фарфоровом изоляторе, регистрируемые осциллографом, определяются интегральным откликом измерительной системы и спектром излучения ЧР и лежат в диапазоне до 200 МГц.
5. Частота следования импульсов ЧР в фарфоре примерно равна 50...500 Гц, а для поликарбоната составляет ~4 кГц.

6. Основная частота акустического сигнала 38...40 кГц для фарфора и в районе 30 и 90...100 кГц для поликарбоната.
7. Величина заряда колеблется от 200 нКл для изоляторов из фарфора и до ед. нКл – для поликарбоната.
8. Ток ЧР изменяется от 0,2 А в изоляторе из поликарбоната до 40 А в фарфоровом изоляторе.
9. Регистрируемые в исследованиях акустические и электромагнитные импульсы являются частичными разрядами, т.к. по своим характеристикам (длительности импульсов, величины зарядов) они мало отличаются от параметров ЧР.

Авторы выражают глубокую признательность за предоставление возможности и помощь в проведении экспериментальных работ профессору ТПУ В.В. Лопатину, сотрудникам ИрГУПСа: к.т.н., доценту Н.И. Молину, к.т.н., доценту В.П. Закарюкину, С.В. Попову, д.ф.-м.н., профессору В.И. Барышникову, сотрудникам дорожно-электротехнической лаборатории ВСЖД И.И. Рындину и А.Н. Степанову, д.т.н., профессору НГТУ А.Г. Овсяникову, к.т.н. В.П. Вдовико и А.Н. Бондаренко за консультации и любезно предоставленные материалы по регистрации ЧР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроботенко А.Ф., Свешников В.В., Кротенко Е.А. Тепловыделения в подвесном фарфоровом тарельчатом изоляторе в условиях контактной подвески // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Матер. Всеросс. научно-техн. конф. с международным участием: В 2 т. – Т. 1. – Красноярск, Гротеск, 2005. – С. 632.
2. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / А.В. Ефимов, А.Г. Галкин. – М.: УМК МПС России, 2000. – С. 169, 205–210.
3. Базанов В.П., Спирин М.В., Тураев В.А. Ультразвуковой метод контроля фарфоровой изоляции воздушных линий электропередачи 35 – 220 кВ // Энергетик. – 2000. – № 4. – С. 16–17.
4. Матяев Ю.С. Методы определения источника радиопомех // Автоматика, телемеханика и связь. – 1997. – № 9. – С. 23–24.
5. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 99–102.
6. http://www.uesystems.com
7. Кириленко В.М. Частичные разряды как основной фактор разрушения твердых диэлектриков (основы теории) // Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция: Сб. докл. Межвуз. научно-практ. конф. по вопросам создания и методам испытания высоковольтной электрофизической аппаратуры. – М.: Энергия, 1967. – С. 447–455.
8. Овсянников А.Г. Пространственно – временные и энергетические характеристики частичных разрядов в воздушных полостях твердых диэлектриков // Научный вестник НГТУ. – 1999. – № 2(5). – С. 123–36.
9. Богданов Ю.Г., Рогацкий В.Г. К вопросу дефектировки изоляторов контактной сети // Вестник ВНИИЖТа. – 2003. – № 3. – С. 28–30.
10. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – М.: Техинформ, 2000. – С. 73.
11. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). – М.: Трансиздат, 2002. – С. 146.
12. Техника высоких напряжений / Под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2003. – С. 212–220.
13. Рыбаков Л.М. Методы и средства обеспечения работоспособности электрических распределительных сетей 10 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – С. 121–136.